

УДК 621.914

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук, **С.И. ДЯДЯ**, канд. техн. наук,
Е.Б. КОЗЛОВА, Запорожье, Украина

ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СИЛ ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ОТ СТАТИЧЕСКИХ К ДИНАМИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ ОБРАБОТКИ (часть 2)

У статті показано, що при вивченні динаміки процесів різання необхідно враховувати не тільки сили різання, але і структурні властивості як інструменту, так і оброблюваної деталі. Проведено аналіз методів дослідження вібрацій. Описано пристрої, що дозволяють спостерігати умови появи, розвитку і виродження автоколивань.

Ключові слова: динаміка процесів різання, методи дослідження вібрацій, автоколивання

В статье показано, что при изучении динамики процессов резания необходимо учитывать не только силы резания, но и структурные свойства как инструмента, так и обрабатываемой детали. Проведен анализ методов исследования вибраций. Описаны устройства, позволяющие наблюдать условия появления, развития и вырождения автоколебаний.

Ключевые слова: динамика процессов резания, методы исследования вибраций, автоколебания

The article shows that the study of the dynamics of cutting process should take into account not only the cutting force, and structural properties as a tool and the workpiece. The analysis of vibration research methods. We describe the device, allowing to observe the conditions of the emergence, development and degeneration of oscillation.

Keywords: dynamics of cutting process, vibration research methods, oscillation

В обзоре J. Tlustý [1], одного из основоположников рассмотрения процесса резания в сочетании со свойствами упругой системы СПИД, приведена наглядная схема, рис. 1, возбуждения автоколебательного процесса при резании, на которой силы резания (F_1 и F_2) действуют на систему СПИД, условно показанную в виде упругого замкнутого контура – s . Процесс резания (Cutting process) и упругая система СПИД (Machine structure) в процессе обработки создают колебательный контур, в котором силе резания F противостоит реакция упругой системы Y . Таким образом, если при изучении сил резания в рассмотрение вводится и перемещение упругой системы СПИД, то задача из статической становится динамической.

1. Исследование динамики цилиндрического фрезерования

Под динамическим понимают такое воздействие сил на тело, которое вызывает его движение. В случае воздействия сил резания на упругие тела (инструмент и (или) деталь) возникает их движение, т. е. колебания.

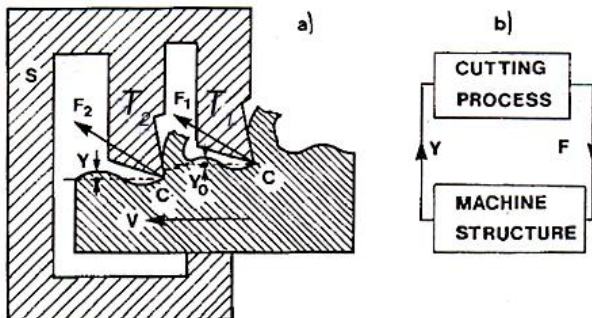


Рисунок 1 – Связь упругой системы СПИД и процесса резания [1]

Таким образом, если при рассмотрении статических условий фрезерования (рис. 2) объектом рассмотрения являются только силы резания, то при динамических условиях фрезерования (рис. 3) объектом рассмотрения являются воздействие и взаимовлияние силы резания P и перемещения (колебания) $y(t)$ детали относительно установленного припуска, равного $-a_e$. В данном случае сила отталкивания P_y является возмущающей силой, приводящей в движение (смещение) деталь, на которую она воздействует. Простейшая динамическая модель с одной степенью свободы приведена на рис. 4 – груз на пружине и демпфер.

Приложенная к массе сила $F(t)$ вызывает на выходе системы смещение $y(t)$. Формула (1) связывает все виды сил, действующих на упругую систему:

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + c \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = F(t), \quad (1)$$

где $m \frac{d^2 y(t)}{dt^2}$ – инерционная сила;

$c \frac{dy(t)}{dt}$ – сила демпфирования;

$ky(t)$ – сила упругости;

$F(t)$ – сила резания при удалении припуска (возмущающая сила).

Колебательная система включает груз массой m и упругий элемент, имеющий в направлении перемещения жесткость k . Отклонившись от

$$\omega_c = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2)$$

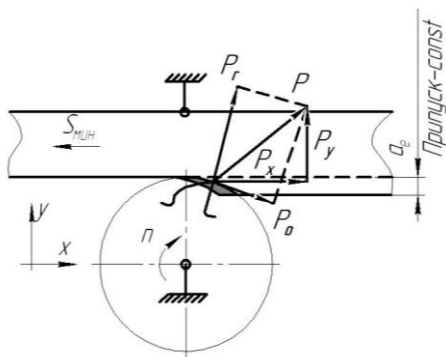


Рисунок 2 – Статическая схема цилиндрического фрезерования

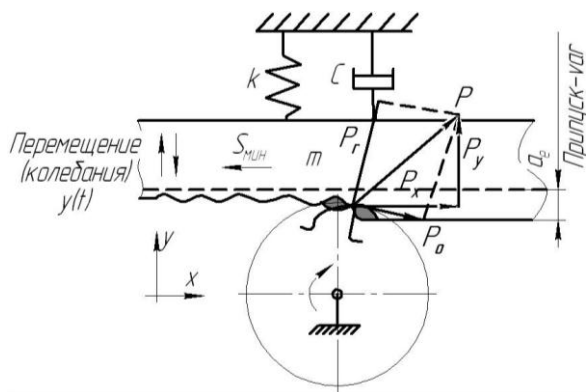


Рисунок 3 – Динамическая схема цилиндрического фрезерования с одной степенью свободы по оси y

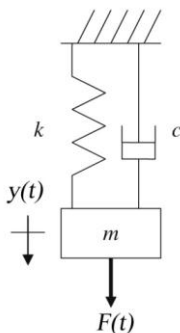


Рисунок 4 – Колебательная система с одной степенью свободы

При действии трения или демпфирования свободные колебания затухают. Демпфирование характеризуется коэффициентом, который называется логарифмическим декрементом затухания. В обычных системах этот коэффициент положителен.

Однако когда в ряде случаев возникает особый механизм колебаний, при которых колеблющаяся система черпает из среды, в которой происходят колебания (в нашем случае из зоны резания) дополнительную энергию, коэффициент демпфирования становится отрицательным и колебания во времени нарастают. Стабилизируются они на достаточно высоком уровне. Такие колебания называются самовозбуждающимися или автоколебаниями.

Таким образом, в колебательной системе тела массой m , жесткостью k и коэффициентом демпфирования – C могут возникать свободные колебания с собственной частотой – ω_c , вынужденные колебания с частотой воздействия возмущающей силы – $\omega_{\text{вын}}$ и самовозбуждающиеся колебания с частотой автоколебаний – $\omega_{\text{авт}}$.

Поэтому при изучении динамики процессов резания исследуют не одну, а две проблемы [2]:

1. Модель силы резания.
2. Амплитудно – частотную характеристику колебания режущей кромки инструмента относительно удаляемого припуска.

Конечной целью динамических исследований является определение условий обработки, при которых можно уменьшить колебания до допустимого уровня.

В условиях концевой цилиндрического фрезерования всегда присутствуют вынужденные колебания, связанные с действием возмущающей силы со стороны зуба фрезы при врезании, резании и выходе из-под стружки. Во многих случаях особенно при срезании припуска с малыми радиальными и осевыми глубинами наблюдаются свободные

колебания детали и инструмента, во время холостого хода между соседними зубьями. А также, могут возбуждаться автоколебания из-за появления волнистого следа на поверхности резания и свободной поверхности стружки от прохода предыдущего зуба.

Модель динамической силы резания при фрезеровании отличается от статической введением в расчет изменения толщины срезаемой стружки из-за волн, оставляемых в результате регенеративных автоколебаний. Рис. 5.

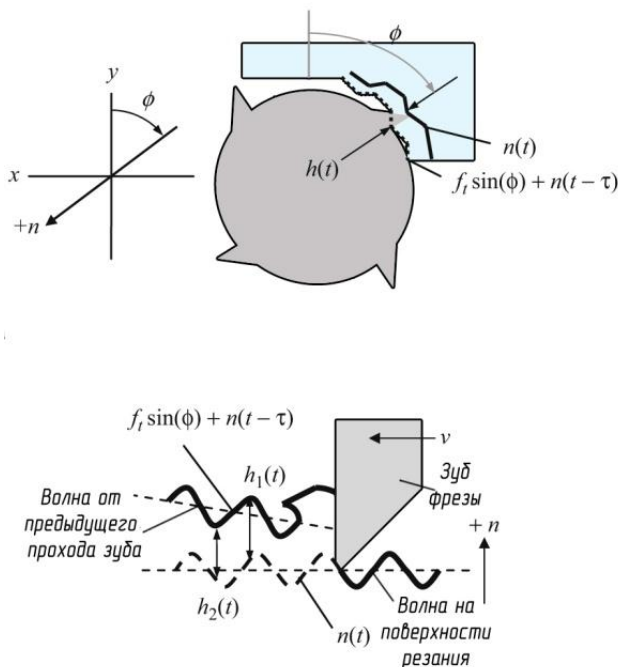


Рисунок 5 – К расчету толщины среза при цилиндрическом фрезеровании в условиях регенеративных автоколебаний [3]

В этом случае толщину среза можно записать выражением 3 [3]:

$$h(t) = f_t (\sin \varphi) + n(t - \tau) - n(t), \quad (3)$$

где $f_t (\sin \varphi)$ – толщина среза в зависимости от угла поворота зуба фрезы φ и подачи на зуб f_t . Эту зависимость используют при расчете статической силы;

$n(t - \tau) - n(t)$ – изменение толщины среза в результате наложения волн от предыдущего и настоящего проходов зуба фрезы;
 n – направление перпендикуляра к толщине среза.

$$n = x \sin \varphi - y \cos \varphi \quad (4)$$

τ – период зубцовой частоты, равный:

$$\tau = \frac{60}{\Omega N_t}, \quad (5)$$

где Ω – частота вращения шпинделя, об/мин;

N_t – количество зубьев фрезы.

В зарубежной литературе хорошо представлены алгоритмы расчета динамических сил резания [2, 3, 4], с учетом регенеративных автоколебаний, изменяющих толщину среза.

Несмотря на значительные успехи в изучении динамики резания, однако, и сегодня остается открытым вопрос, каким образом зона стружкообразования и контактные поверхности инструмента оказывают влияние на характеристики демпфирования автоколебаний.

В 80-х годах прошлого столетия в рамках программы CIRP под руководством J. Tlusty [1] в ряде ведущих лабораторий Великобритании, США, Германии и Чехии были проведены исследования по изучению влияния условий резания на возникновение автоколебаний (chatter). Исследования проводили при помощи анализа значений (DCFC) – динамических коэффициентов силы резания.

Были разработаны различные методики исследований, в которых искусственно создавали колебания режущей кромки инструмента относительно снимаемого припуска. Получено много полезных результатов, особенно о роли радиуса округления режущей кромки, площадки износа по задней поверхности, комплексного влияния скорости и толщины среза при резании различных материалов. Была дана положительная оценка возможности подавления автоколебаний в результате применения многозубых инструментов с нерегулярным шагом, изменяющимися углами наклона винтового зуба, синусоидальной режущей кромкой. Подробно рассмотрено изменение рабочих углов (переднего и заднего) и условий контактирования задней поверхности при прохождении режущего лезвия по волновому следу на поверхности резания. Рис. 6. В этом случае при движении инструмента в позиции B передний угол становится максимальным γ_{\max} , а задний минимальным α_{\min} , а в позиции D наоборот γ_{\min} , а α_{\max} .

Но, так как, все исследования [1] проводили только при точении быстрорежущим инструментом (ограничение по скоростям резания и

попадание в скоростную зону наростообразования), без строго учета условий износа инструмента и изменении толщины среза, то в задачах для будущего изучения автоколебаний определялась необходимость:

1. Исследовать в качестве инструментального материала твердый сплав.
2. Провести широкие исследования для процессов концевой фрезерования и развертывания.
3. Создать новые методики исследования автоколебательного процесса при резании, с помощью которых возможно оценивать влияние различных условий обработки на подавление вибраций.
4. Уделять особое внимание процессу формирования стружки и роли износа инструмента.

За последние десятилетия на промышленных предприятиях появились фрезерные станки с высокоскоростными шпинделями, позволяющие вести обработку до 20000 об/мин и выше.

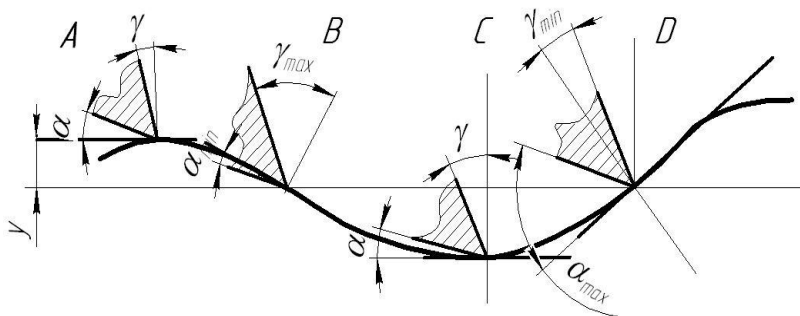


Рисунок 6 – Геометрия взаимодействия режущего лезвия «wave cutting» (волной на поверхности резания) [1]

Практика их применения показала, что с изменением частоты вращения шпинделя появляются зоны повышенных вибраций, которые можно определять с помощью «лепестковых диаграмм», рис. 7. Значительное количество зарубежных исследований в последнее время посвящается вопросам разработки расчетных методов определения зон устойчивости [2-6 и др] с помощью «лепестковых диаграмм». В основе этих расчетов принимают введенное ранее понятие о причине возникновения автоколебаний, как результата резания по предыдущему вибрационному следу.

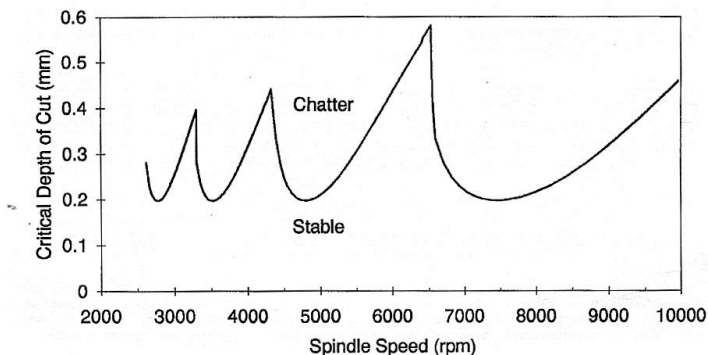


Рисунок 7 – Лепестковая диаграмма устойчивости процесса концевго фрезерования

Однако в работе Логоминова В.А. [7] (2013 г.) экспериментально показано, что при фрезеровании тонкостенной детали с увеличением частоты вращения шпинделя (об/мин), причиной возникновения отклонения детали могут служить совершенно разные механизмы их возбуждения. Рис. 8.

При $n_{фр} = 224$ об/мин осциллограмма отклонения детали от положения равновесия носит периодический характер вынужденных колебаний, характеризую величину вынуждающей силы P_y в направлении Y (см. рис. 3).

Однако с увеличением частоты вращения фрезы до $n_{фр} = 560$ об/мин на вынужденные колебаний начинают накладываться регенеративные автоколебаний, которые существенно ухудшают качество обработанной поверхности, вызывая появление регулярной волнистости. На осциллограммах также появляются и свободные колебания детали.

При дальнейшем увеличении частоты вращения регенеративный эффект постепенно вырождается и исчезает и при $n_{фр} = 1800$ об/мин на осциллограммах отклонения детали видны только вынужденные колебания во время действия силы P_y и свободные колебания детали с собственной частотой. Причиной появления периодических колебаний силы отжима детали в данном случае является периодическое изменение расположения точки врезания A зуба фрезы в обрабатываемую деталь. Причем при контакте зуба фрезы в точке A с максимальным отклонением обрабатываемой поверхности – Δ возникает наибольшее значение максимальной силы отжима.

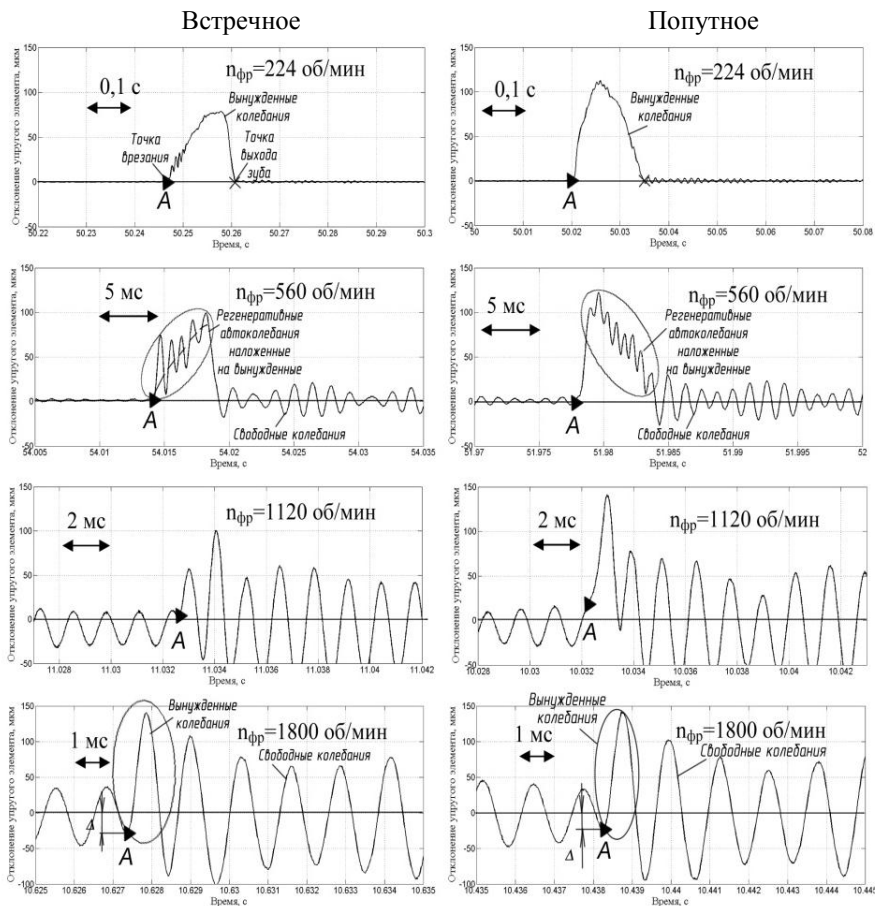


Рисунок 8 – Осциллограммы отклонения тонкостенной детали при различных частотах вращения фрезы
 $(S_z = 0,05 \text{ мм/зуб}, a_p = 3,4 \text{ мм}, a_e = 0,5 \text{ мм})$ [7]:
 ► А – точка врезания зуба фрезы в деталь

Таким образом, установлено, что на традиционном фрезерном оборудовании (до 2000 об/мин) основной причиной возникновения вибраций являются автоколебания, наложенные на вынужденные колебания. На современном оборудовании с высокоскоростным шпинделем могут наблюдать как смешанные вибрации, состоящие из вынужденных колебаний на которые накладываются автоколебания, так и просто вынужденные колебания от врезания зуба фрезы в свободно колеблющуюся деталь.

В табл. 1 приведены материалы многих исследований [8-10 и др.], из которых можно видеть, что изменение различных условий резания не всегда аналогичным образом влияет на силу резания P и амплитуду автоколебаний A .

Увеличение скорости вращения шпинделя показывает существование нескольких зон, в которых возбуждение вибраций активизируется, несмотря на малое монотонное уменьшение и стабилизацию силы резания P . Автоколебания возбуждаются в определенной скоростной зоне и с увеличением скорости вращения шпинделя вырождаются.

При рассмотрении влияния других условий обработки на изменение силы резания P и амплитуды автоколебаний A при скорости возбуждения автоколебаний (v_2) можно отметить следующее:

- С увеличением глубины резания (t) (ширины среза – b) сила резания P увеличивается пропорционально, увеличивается и интенсивность автоколебаний – амплитуда A .

- С увеличением подачи на зуб (S_z) (толщина среза – a) сила резания увеличивается, а интенсивность автоколебаний снижается.

- С увеличением положительного переднего угла (γ) снижается и сила резания и интенсивности автоколебаний.

- С увеличением заднего угла (α) незначительно уменьшается сила резания, но увеличивается амплитуда колебаний.

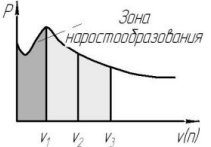
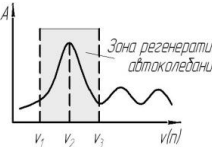
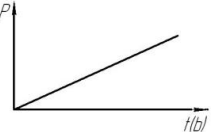
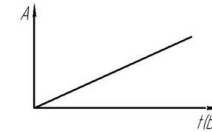
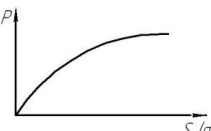
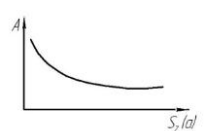
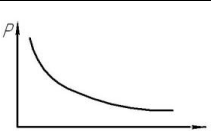
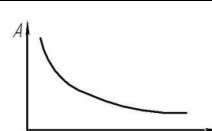
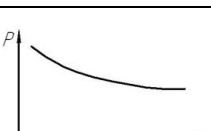

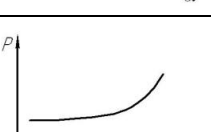
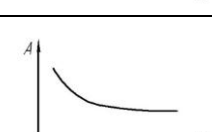
- Величина износа по задней поверхности увеличивает силу резания, но способствует уменьшению амплитуды автоколебаний.

- Увеличение угла наклона режущей кромки λ (ω) незначительно изменяет силу резания, однако положительно влияет на гашение автоколебаний. Уровень влияния угла наклона режущей кромки – ω при различных направлениях подачи (встречное или попутное) на подавление вибраций требует более тщательного изучения. Многими зарубежными фирмами начато производство цилиндрических фрез с незначительным (2-3°) отличием в углах наклона соседних режущих зубьев $\Delta\omega$, рекламирующих для этой конструкции фрез значительный эффект в подавлении вибраций.

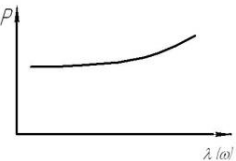
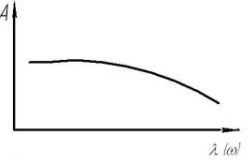
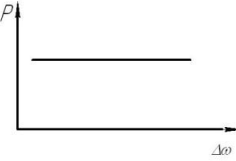
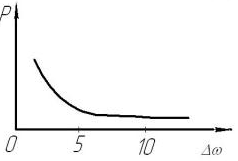
2. Анализ современных методик исследования вибраций при фрезеровании

Ранее отмечалось, что при фрезеровании могут наблюдаться несколько видов колебательного движения. Вынужденные колебания возникают всегда при входе зуба под стружку и выходе зуба из–под стружки. Вынужденные колебания происходят с «зубцовой» частотой, но если ось фрезы не совпадает с осью вращения шпинделя или вершины зубьев фрезы после заточки не лежат на окружности, то наблюдается дополнительное биение с «оборотной» частотой.

Таблица 1 – Влияние основных режимов резания и геометрии концевой цилиндрической фрезы на силу резания P и амплитуду A регенеративных автоколебаний

Условия резания	Влияние условий резания на силу резания $P(n)$	Влияние условий резания на амплитуду регенеративных автоколебаний A
1	2	3
Скорость $v(n)$, м/с n – частота вращения шпинделя		
Глубина, t , мм (ширина среза b , мм)		
Подача S_z , мм/зуб (толщина среза a , мм)		
Передний угол γ , град		
Задний угол α , град		
Износ по задней поверхности δ_s , мм		

Продолжение табл. 1

1	2	3
Угол наклона режущей кромки λ (ω), град		
Разнонаклонность соседних зубьев, $\Delta\omega$		

Примечание: 1. Регенеративные автоколебания наблюдаются в диапазоне скоростей $v_1 - v_3$. 2. Влияние условий резания на силу P и амплитуду автоколебаний A приведены для скорости v_2 .

Работа Васина С.А. [11] (2006 г.) посвящена исследованию именно этих видов колебаний. Схема исследований приведена на рис. 9, где колебания силы резания измеряются динамометром (разделяя ее значение на статическую P_z^{stat} и динамическую $P_z^{дин}$ составляющие), рис. 10, 11, а амплитудно-частотная характеристика (рис. 12) строится по результатам измерения колебаний образца, зажатого в тисках, акселерометром. Автоколебания, возникающие во время резания каждым зубом из-за появления волнистости на свободной поверхности и поверхности резания в этих условиях измерения, не могут быть определены и, естественно, не рассматривались.

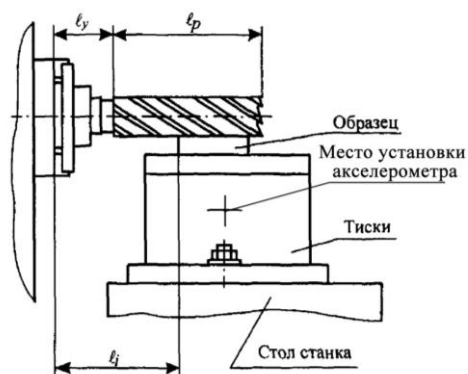


Рисунок 9 – Схема установки концевой фрезы относительно заготовки [11] (2006 г.)

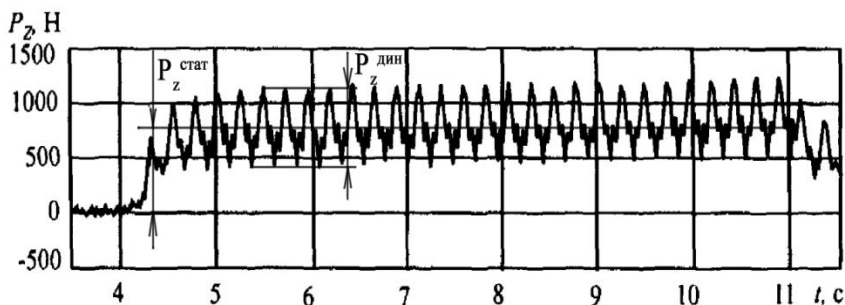


Рисунок 10 – Типичная осциллограмма силы резания в процессе фрезерования плоскости концевой фрезой

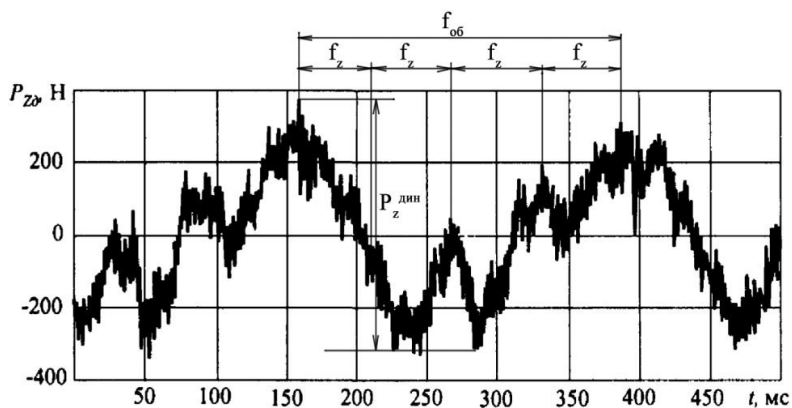


Рисунок 11 – Фрагмент типичной осциллограммы изменения динамической составляющей силы резания [11]

Панчуком В.Г. [12] (2009 г.) рассмотрен алгоритм расчета составляющих силы резания во время работы отрезными фрезами при изменении площади срезаемого слоя, связанной с геометрией инструмента, размерами и формой отрезаемого прутка и режимами фрезерования. Определение мгновенных значений силы резания на протяжении периода полного цикла отрезания обеспечивает получение временных реализаций составляющих силы резания, которые учитывают нестационарный характер нагружения отрезной фрезы при ее работе.

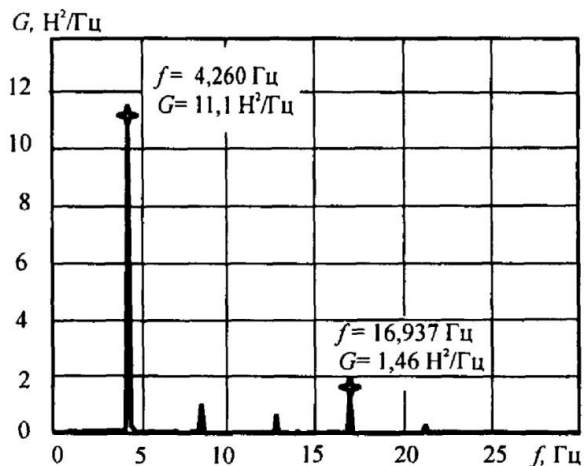


Рисунок 12 – Амплитудно–частотная характеристика колебательного процесса фрезерования [11]

Эти данные, по утверждению автора, позволяют оценить динамическую устойчивость отрезной фрезы. В качестве сравнительной характеристики динамического состояния дисковой фрезы используют амплитуду вынужденных колебаний B_{ij} , которую определяют по формуле:

$$B_{ij} = \frac{C_j p_j^2}{\omega_i^2 - p_j^2}, \quad (6)$$

где p_j – круговая частота контакта зубьев;

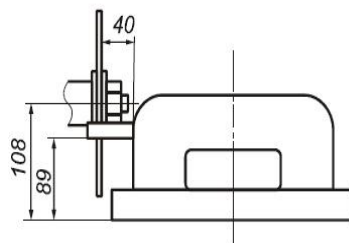
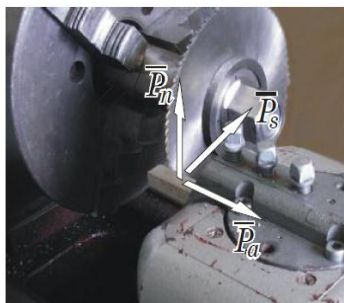
C_j – амплитуда вынуждающей силы резания;

ω_i – собственная круговая частота дисковой фрезы.

В качестве критерия оценки динамической устойчивости фрезы при данных условиях фрезерования принимают максимальное значение по абсолютной величине амплитуды вынужденных колебаний:

$$C_{r\max} = (|B_{ij}|), \quad (7)$$

На рис. 13 показана схема измерения составляющих силы резания с помощью динамометра УДМ–600, а также расчетное и измеренное значение силы отжима, рис. 14.



а

б

Рисунок 13 – Схемы ориентации составляющих силы резания (а) и закрепления заготовки (б) при ее отрезке [12] (2009 г.)

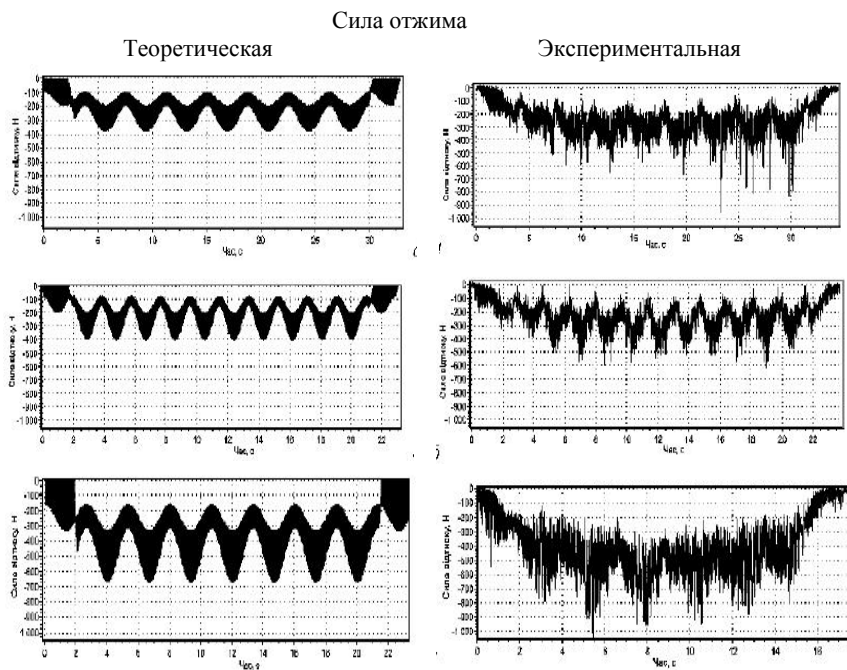


Рисунок 14 – Теоретическая и экспериментальная временная реализация силы отжима при различных значениях $C_{r\max}$:

а) $C_{r\max} = 0,5H$, $\varepsilon_{np} = 5,9\%$; б) $C_{r\max} = 4,6H$, $\varepsilon_{np} = 10,8\%$;

в) $C_{r\max} = 173,3H$, $\varepsilon_{np} = 12,4\%$ [12] (2009 г.)

Таким образом, в данных исследованиях рассматривают только колебания сил резания, а собственную частоту диска фрезы рассчитывают. Другими словами и в этом случае основной причиной возбуждения колебаний при фрезеровании считают вынужденные колебания, а возбуждение автоколебаний не рассматривают.

В работе S. Kato [13] (1981 г.) изучается колебание силы резания при фрезеровании плоскости однозубой фрезой с винтовым зубом, рис. 15. В данных исследованиях в качестве упругого элемента, по деформации которого измеряют значения составляющих силы резания, используют оправку для крепления фрезы, на торце которой установлено зеркало. При изгибе оправки, отраженный от зеркала луч света отклоняется и по величине отклонения в различных плоскостях определяют значения составляющих силы резания. Обрабатываемая деталь намного более жесткая по сравнению с инструментом. В данном способе появляется возможность измерять силу резания непосредственно во время прохождения зубом фрезы под срезаемой стружкой. Несмотря на то, что авторы статьи рассматривают колебание силы, измеряя ее величину от момента врезания зуба под стружку до момента выхода из-под стружки, т.е. вынужденные колебания, однако, на экспериментальной кривой изменения силы появляются волны (при попутном фрезеровании стали), которые характеризуют появление дополнительных автоколебаний, рис. 15.

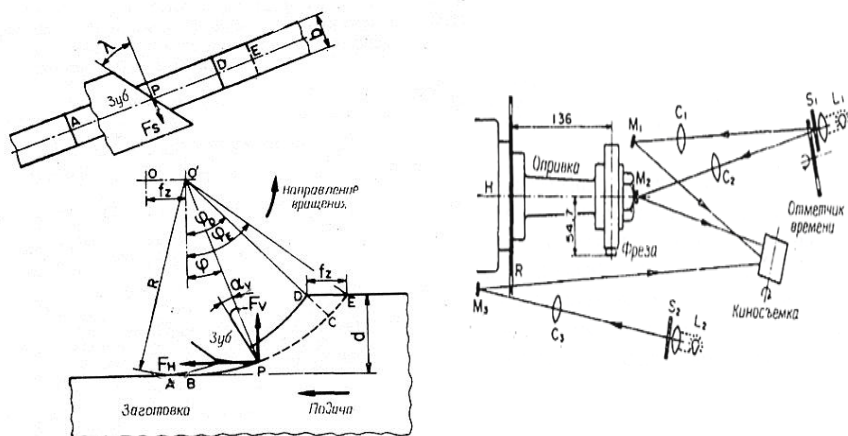
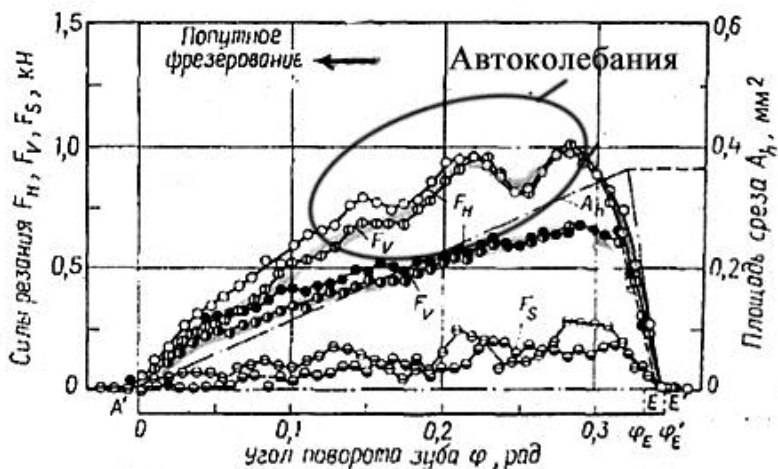


Рисунок 15 – Оптическая система для измерения силы резания [13];

L – источник света; C_{1, 2, 3} – конденсаторные линзы; M_{1, 2, 3} – зеркала;

H – передняя бабка токарного станка; R – диск с щелями



6

Рисунок 16 – Коливання горизонтальної, вертикальної та осевої сили різання при попутному фрезеруванні ($\alpha = 0^\circ$, $\lambda = 25^\circ$, $b = 3$ мм, $d = 3$ мм, $f_z = 0,35$ мм/зуб) [13]:

○ ○ ○ – углеродиста сталь, ● ● ● – чугун з шаровидним графітом

С.У. Huang [14] (2011 г.) при изучении влияния условий резания на динамические силовые факторы и процессы демпфирования при фрезеровании, применяет специальное устройство для закрепления обрабатываемого образца, рис. 17, которое позволяет детали совершать колебательные движения в направлении ее минимальной жесткости. Автор рассматривает колебательную систему с одной степенью свободы. Инструмент (концевая фреза) значительного диаметра принимается условно жестким. На осциллограммах отклонений детали, рис. 18, при частоте вращения шпинделя $n = 420$ об/мин хорошо видны волны, возникающие в результате появления автоколебаний. С увеличением частоты вращения до $n = 840$ об/мин автоколебания вырождаются, зато появляются, существенные по величине, свободные колебания после выхода зуба фрезы из-под стружки.

Аналогичную систему измерения колебаний при концевом фрезеровании применил Ahmad Yusoff в PhD работе [15] (2010 г.), рис. 19.

Особенностью последних рассмотренных работ является отказ от применения стандартных динамометров для изучения вибраций при фрезеровании. Это связано с их высокой жесткостью, которая не позволяет проводить изучение возбуждения автоколебаний, в направлении изменения толщины срезаемого слоя из-за явлений регенерации.

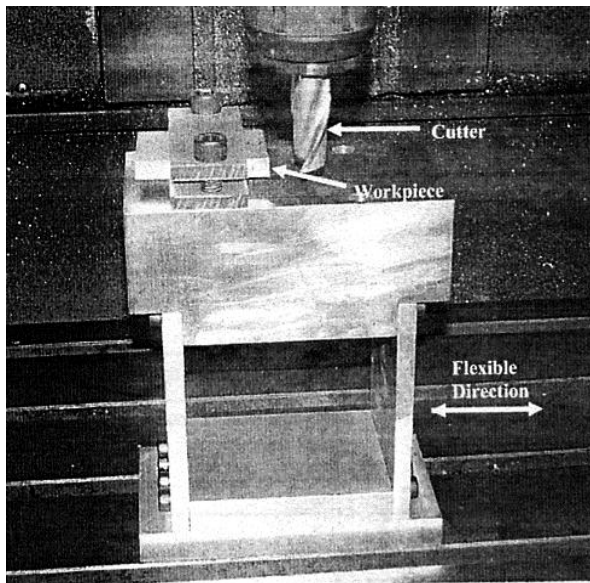


Рисунок 17 – Устройство для исследования колебаний при концевом фрезеровании [14] (2011 г.)

Основным недостатком рассмотренных выше устройств для измерения вибраций является невозможность изменения их динамических характеристик (жесткость, демпфирования, массы и частоты собственных колебаний).

Эти недостатки были устранены в работе Логоминова В.А. [7] (2013 г.), в которой применили устройство, рис. 20, где в качестве упругого элемента была использована защемленная пластина с обрабатываемым образцом, жестко закрепленная на ее торце. При фрезеровании пластина выполняла роль упругой системы (УС) детали. Соотношение размеров пластины и обрабатываемого образца позволяло избегать появления крутильных колебаний, поэтому УС детали испытывала только изгибные колебания по 1 форме.

Изменение динамических характеристик УС детали легко получали путем присоединения дополнительной массы – 5, введением демпфирующих сред – 13 или изменением вылета пластины – 2. Колебания обрабатываемого образца измеряли индуктивным датчиком перемещений – 10. Разработанное устройство позволяет отдельно изучать влияние геометрии фрезы, условий резания и динамических характеристик детали на условия возбуждения всех видов колебаний: вынужденных колебаний, автоколебаний и свободных колебаний. Для эффективного применения разработанного устройства инструмент должен быть максимально жестким.

$n = 420$ об/мин

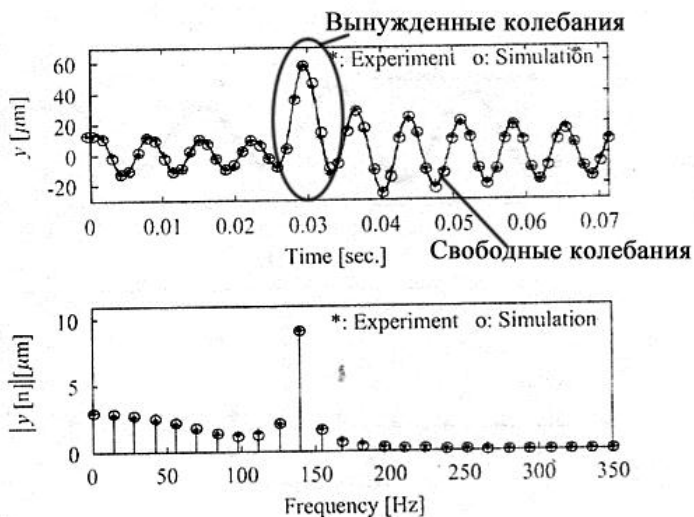
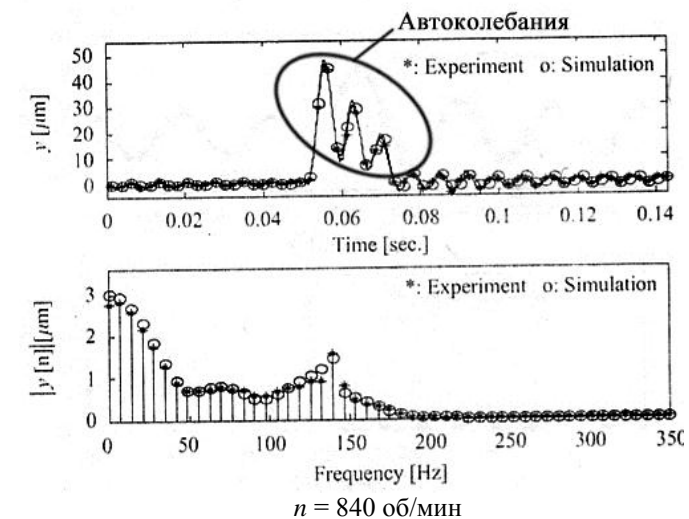


Рисунок 18 – Сравнение экспериментальных и расчетных результатов при исследовании вибраций и АЧХ детали [14] (2011 г.)

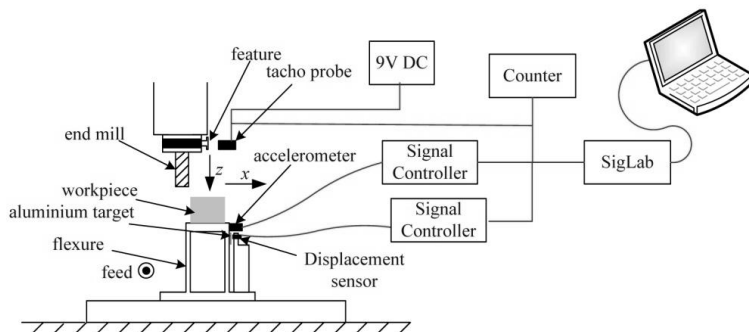


Рисунок 19 – Экспериментальная установка для исследования колебаний при концевом фрезеровании [15] (2010 г.)

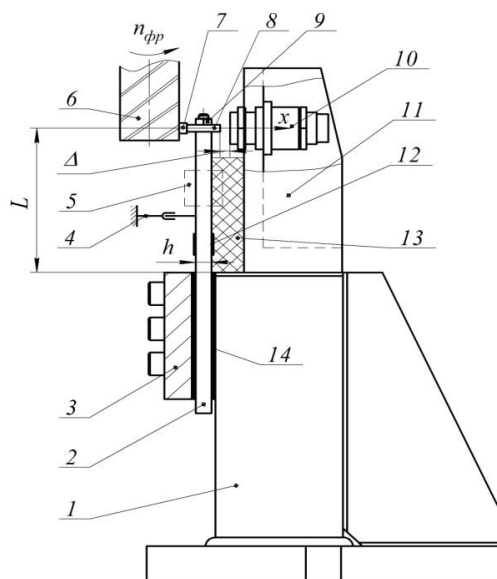


Рисунок 20 – Принципиальная схема устройства для исследования механических колебаний при фрезеровании тонкостенных деталей [7] (2013 г.):

- 1 – основание; 2 – упругий элемент (защемленная пластина); 3 – пружин;
- 4 – демпфер; 5 – дополнительная масса; 6 – концевая цилиндрическая фреза;
- 7 – режущий элемент; 8 – образец; 9 – гайка; 10 – индуктивный датчик;
- 11 – стойка; 12 – тензодатчик; 13 – вязкоупругая демпфирующая среда (демпфер);
- 14 – демпфирующие прокладки

Однако, при изучении осциллограмм отклонений детали при высоких частотах вращения шпинделя (рис. 8, $n \geq 560$ об/мин) на данном устройстве не возможно определить точку выхода зуба фрезы из-под стружки, что не позволяет точно измерить время резания $t_{рез}$ и время холостого хода $t_{х.х.}$. В связи с этим, возникает необходимость усовершенствования этого устройства путем добавления в его измерительную систему возможности точного определения на осциллограмме отклонения детали точек начала и окончания контакта зуба фрезы с деталью.

Выводы

1. Показано, что при изучении динамики процессов резания, в которой рассматривается условия возбуждения вибраций необходимо учитывать не только силы резания, но и структурные свойства (жесткость, массу, характеристики демпфирования и собственные частоты колебаний) как инструмента, так и обрабатываемой детали. В зарубежной литературе разработаны и получают дальнейшее развитие теория регенеративных автоколебаний и методы построения «лепестковых» диаграмм для определения виброустойчивых условий фрезерования в широком скоростном диапазоне. Исследования в данном направлении особенно актуальны при обработке тонкостенных деталей на станках с ЧПУ, так как в этом случае возникает высокая вероятность возбуждения нежелательных вибраций.

2. Анализ методов исследования вибраций показал, что в последнее время колебания изучают не с помощью динамометров, а с помощью специальных упругих систем, оснащенных датчиками перемещения и акселерометрами. Данные устройства позволяют наблюдать условия появления, развития и вырождения автоколебаний, которые могут быть наложены на вынужденные колебания, а также в условиях неравномерного фрезерования с выходом зубьев из зацепления с припуском измерять и свободные затухающие колебания детали и фрезы.

Список использованных источников: 1. *Thusty J.* Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics / J. Thusty // *Annals of the CIRP*. – 1978. – Vol. 2. – P. 583–589. 2. *Opitz H.* Improvement of the dynamics stability of the milling process by irregular tooth pitch / H. Opitz, E. U. Dregger, H. Rose // *Advances in Machine Tool Design and Research, Proc. of MTDR Conference, 1966*. – № 7. – P. 13–227. 3. *Schmitz T. L.* Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity / *Tony L. Schmitz, Kevin S. Smith*. – Springer Science Business Media, LLC, 2009. – 310 hp. 4. *Budak E.* Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi-Degree of Systems in Milling. Part I: Modeling / E. Budak, Y. Altintas // *Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. – 1998. – Vol. 120. – P. 22–30 5. *Opitz H.* Improvement of the dynamics stability of the milling process by irregular tooth pitch / H. Opitz, E. U. Dregger, H. Rose // *Advances in Machine Tool Design and Research, Proc. of MTDR Conference, 1966*. – № 7. – P. 13–227. 6. *Yusoff A.R.* Literature review of optimization techniques for chatter suppression in machining / A. R. Yusoff, M. R. Z. M. Suffian, M. Y. Taib // *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES) ISSN (Print): Volume 1*, 2011, P. 47–61. 7. *Логоминов В. А.* Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: дис. ... канд. техн. наук.: 05.03.01: защищена 21.02.2013: утв. 25.04.2013 / Логоминов Виктор Алексеевич. –

Запорожье, 2013. – 226 с. **8.** Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / Мазур Н. П., Внуков Ю. Н., Грабченко А. И. и др. ; под общ. ред. Н. П. Мазура и А. И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с. **9.** Козлов А. А. Фрезерование цветных металлов и сплавов: Автореферат дис.... канд. техн. наук. – Томск, 1966. 24 с. **10.** Yusoff A. R. The role of tool geometry in process damped milling / A. R. Yusoff, S. Turner, Ch. M. Taylor, N. D. Sims // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-010-2586-6 Springer Publication (in press). P. 883-895. **11.** Васин С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. Серия «Библиотека инструментальщика». – М.: Машиностроение, 2006. – 384 с. **12.** Панчук В. Г. Теоретичні, основи проектування відрізних фрез : автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 / В. Г. Панчук; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – К., 2009. – 36 с. **13.** Kato S. Связь между колебаниями силы резания и условиями резания при фрезеровании плоскости. Часть 1. Фрезерование плоскости однозубой фрезой с винтовым зубом / С. Kato, T. Yamada, M. Khosimoto, K. Yamahuty // Коструирование, 1982, т. 103, №2, С. 211–228. **14.** Hung C. Y. Effects of cutting conditions on dynamic cutting factor and process damping in milling / C. Y. Hung, J.-J. Junz Wang // Internation jornal of Machine Toola and Manufacture 51, 2011, P. 320–330. **15.** Yusoff A. R. Optimization of variable helix end milling tools / Qualification: PhD Date awarded: 22.09.10 Submitted for the degree of Doctor of Philosophy, August 2010.

Bibliography (transliterated): **1.** Tlustý J. Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics / J. Tlustý // Annals of the CIRP. – 1978. – Vol. 2. – P. 583–589. **2.** Opitz H. Improvement of the dynamics stability of the milling process by irregular tooth pitch / H. Opitz, E. U. Dregger, H. Rose // Advances in Machine Tool Design and Research, Proc. of MTDR Conference, 1966. – No 7. – P. 13–227. **3.** Schmitz T. L. Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity / Tony L. Schmitz, Kevin S. Smith. – Springer Science Business Media, LLC, 2009. – 310 p. **4.** Budak E. Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi-Degree of Systems in Milling. Part I: Modeling / E. Budak, Y. Altintas // Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1998. – Vol. 120. – P. 22–30. **5.** Opitz H. Improvement of the dynamics stability of the milling process by irregular tooth pitch / H. Opitz, E. U. Dregger, H. Rose // Advances in Machine Tool Design and Research, Proc. of MTDR Conference, 1966. – No 7. – P. 13–227. **6.** Yusoff A.R. Literature review of optimization techniques for chatter suppression in machining / A. R. Yusoff, M. R. Z. M. Suffian, M. Y. Taib // Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES) ISSN (Print): Volume 1, 2011, P. 47–61. **7.** Logominov V.A. Formirovanie sherohovatosti obrabotannoy poverhnosti pri kontsevom tsilindricheskom frezerovanii tonkostennykh elementov detaley: dis. ... kand. tehn. nauk.: 05.03.01: zaschislena 21.02.2013: utv. 25.04.2013 / Logominov Viktor Alekseevich. – Zaporozhe, 2013. – 226 p. **8.** Osnovy teorii rezaniya materialov: uchebnyk [dlya vyssh. uchebn. zavedeniy] / Mazur N. P., Vnukov Yu. N., Grabchenko A. I. i dr. ; pod obsch. red. N. P. Mazura i A. I. Grabchenko. – 2-e izd., pererab. i dopoln. – Harkov : NTU «HPI», 2013. – 534 p. **9.** Kozlov A. A. Frezerovanie tsvetnykh metallov i splavov: Avtoreferat dis.... kand. tehn. nauk. – Tomsk, 1966. 24 p. **10.** Yusoff A. R. The role of tool geometry in process damped milling / A. R. Yusoff, S. Turner, Ch. M. Taylor, N. D. Sims // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-010-2586-6 Springer Publication (in press). P. 883–895. **11.** Vasin S. A. Prognozirovanie vibroustoychivosti instrumenta pri tochenii i frezerovanii. Seriya «Biblioteka instrumentalschika». – M.: Mashinostroenie, 2006. – 384 p. **12.** Panchuk V. G. Teoretichni, osnovi proektuvannya vdriznih frez : avtoref. dis... d-ra tehn. nauk: 05.03.01 / V. G. Panchuk; Nats. tehn. un-t Ukraini "KiYiv. polltehn. In-t". – K., 2009. – 36 p. **13.** Kato S. Svyaz' mezhu kolebanyamy syly rezanyya y uslovyamy rezanyya pry frezerovanyy ploskosty. Chast' 1. Frezerovanye ploskosty odnozubyoy frezoy s vynytoym zubom / S. Kato, T. Yamada, M. Khosimoto, K. Yamahuty // Kostruyrovanye, 1982, t. 103, No 2, P. 211–228. **14.** Hung C. Y. Effects of cutting conditions on dynamic cutting factor and process damping in milling / C. Y. Hung, J.-J. Junz Wang // Internation jornal of Machine Toola and Manufacture 51, 2011, P. 320–330. **15.** Yusoff A. R. Optimization of variable helix end milling tools / Qualification: PhD Date awarded: 22.09.10 Submitted for the degree of Doctor of Philosophy, August 2010.